

# 微重力条件下气 / 液两相流流型的研究进展 \*

赵建福

中国科学院力学研究所, 国家微重力实验室, 北京 100080

**摘要** 气 / 液两相流流型是两相流研究领域最基本的课题之一, 至今已有数十年的研究历史. 但是, 由于气 / 液两相流动现象极为复杂, 目前还没有得到一致的结论. 近十多年来, 利用微重力环境减弱甚至完全消除重力的影响, 简化流动中各种不同因素间的相互作用及流型特征, 大大促进了对气 / 液两相流动特征及流型产生与转换机理的研究. 同时, 微重力条件下的气 / 液两相流动是空间技术领域必须解决的关键技术问题之一, 具有重要的学术意义和重大的应用价值. 本文简要总结了微重力条件下气 / 液两相流流型研究的基本方法以及实验结果和理论进展, 指出今后研究中应该注意的一些方向.

**关键词** 微重力, 气 / 液两相流, 流型, 综述

## 1 引言

两相流动 (two-phase flow) 现象广泛存在于自然界和许多工业过程中. 它是流体力学研究的主要分支, 同时又是许多工业过程中迫切需要解决的问题. 流动过程中, 两相介质的分布状况, 即两相流流型 (flow pattern 或 flow regime), 不仅影响到对两相流动参数的准确测量, 而且极大地影响着两相流动压力损失和传热传质等特性, 因此, 该课题的研究一直是两相流研究领域内备受关注的核心问题之一.

在气或汽 / 液两相流 (gas/vapor-liquid two-phase flow) 中, 由于两相介质均可变形, 相界面的形状和分布情况随着流动过程都在不断变化着, 因此流型最为复杂. 在地面常重力 (normal gravity, 简记为 1-g) 条件下, 气 / 液两相流系统中存在着重力、惯性力、表面张力、壁面及相界面剪切应力、湍流脉动应力和环境压力等, 这些因素之间错综复杂的联合作用, 使得流型产生和转换机理极其复杂, 以致于经过了数十年的研究, 仍然没有得到一致的结论, 甚至流型的分类尚未统一. 目前, 基于经验或半经验的气 / 液两相流流型转换判据繁多, 相互间差异极大, 对模型赖以建立的经验之外的、未经校验的情形往往并不成功, 甚至变化趋势完全相反; 流型图往往只具有定性的意义, 只能大致反映出可能存在的流型, 而无法明确给出对应某一条条件下管内的实际流型 (Spedding & Spence (1993); Hewitt (1996))<sup>[1,2]</sup>. 这就要求对气 / 液两相流流型的产生和转换机理进行更深入的研究.

收稿日期: 1998-09-14, 修回日期: 1999-01-22

\* 国家自然科学基金重点项目 (19789201)、攀登计划预选项目 (95-预-34) 和中国博士后科学基金资助项目.

由于气、液两相介质间一般都存在着很大的密度差,常重力条件下重力对其流动特征及流型的产生与转换往往起着主导作用,同时也成为流型复杂化的主要根源.例如,在水平流动中,重力作用导致流动的非对称性,其极端情形即完全的分层流动,气、液两相互不掺混,分别在管道的顶部和底部流动;若管道稍微偏离水平(如倾角为 $1^\circ$ ),重力在轴向的分量就会超过壁面剪切应力的作用,引起流型的剧烈改变;在垂流中,重力会引起相间速度滑移等现象.因此,利用微重力(microgravity或zero-gravity,简记为 $\mu-g$ 或 $0-g$ .文献中也将 $10^{-2}g$ 以下的低重力条件称作微重力,因此,本文中对微重力和低重力两个概念不加区分)环境努力减弱甚至完全消除重力的影响,简化两相流动中各种不同因素间的相互作用,以便于对流型产生和转换机理进行基础性研究,便成为一个有效的途径.显然,微重力条件下的气/液两相流动系统中,前述常重力条件下的许多现象将不再出现,流型也将大大简化,图1为在微重力条件下观察到的3种主要流型:泡状流(bubbly flow或bubble flow),弹状流(slug flow)和环状流(annular flow).有些研究者还定义了其他一些流型,如Zhao & Rezkallah (1993)<sup>[3]</sup>定义的泡沫状弹-环状流(frothy slug-annular flow),它们处于上述主要流型交界处,一般视作两个主要流型间的过渡流型,或根据其为主要特征直接归入某一主要流型之中.

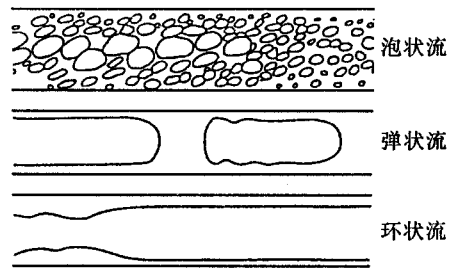


图1 低重力条件下气/液两相流流型分类 (Hewitt, 1996)<sup>[2]</sup>

微重力条件下的气/液两相流动研究除了上述目的外,还有两个直接的应用目的:第一,两相流动是空间站或月球基地等微重力环境中许多问题都涉及到的关键技术,对微重力环境的开发利用有着重要作用.第二,微重力环境中的两相流研究有利于常重力环境中的两相流动规律的研究,从而改进地面两相流系统.这些应用强烈激励了对微重力两相流动的研究.

对微重力条件下气/液两相流动的研究,可以上溯至20世纪60年代,近十多年里更是备受重视(Reinarts et al. (1996); Antar (1996); Hewitt (1996))<sup>[4,5,2]</sup>,其基本研究方法可分为实验研究和理论分析两大类,前者又包括地面模拟实验和微重力实验两种.这里,我们将着重对微重力条件下气/液两相流流型研究的基本方法以及实验和理论结果予以总结,以期对该课题的研究现状及未来发展趋势有一较全面的认识.

## 2 地面模拟实验

地面模拟实验是在地面常重力环境中,设法减弱重力对流动的影响程度,来模拟微重力条件下的气/液两相流动的主要特征.在微重力环境中,重力的作用被大大削弱甚至完全消失后,表面张力将对气/液两相流动特征及其流型的产生和转换产生显著影响.表征重力和表面张力间相对强弱的无量纲参数为Bond数 $Bo = (\rho_L - \rho_G) a D^2 / \sigma$ ,这里, $\rho$ , $a$ , $D$ 和 $\sigma$ 分别表示密度、重力加速度、管道内径和表面张力,下标L和G分别表示液相和气相.因此,要在地面常重力环境中模拟微重力条件下的气/液两相流动,可以采用两种方法:(1)减小两相介质间的密度差( $\rho_L - \rho_G$ );(2)减小实验管道的直径 $D$ .由于Bond数正比于管径 $D$ 的平方,后者更具吸引力.例如,管径减小10倍,Bond数即减小100倍,这相当于重力水平降低为 $10^{-2}g$ .

完全的模拟实验要求模拟流动和真实流动中相对应的所有无量纲参数都相等,实际上往往无法作到.因此,一般仅设法让其中对流动影响最重要的无量纲参数(这里为Bond数)相等,而不再计较其余参数的情况,这将引起对模拟实验结果的解释与利用等的疑虑.不过,模拟实

验尽管不是对微重力条件下气 / 液两相流动的完全模拟, 但作为对微重力实验的重要补充, 仍然为理解微重力条件下气 / 液两相流动特征及流型产生和转换机理提供了大量的信息. 深入的理论研究有望揭示其他无量纲参数的作用, 从而保证对模拟实验结果的正确解释与合理利用.

## 2.1 中性悬浮实验

利用密度相同或相近但不互溶的两种液体在地面常重力环境中模拟微重力条件下的气 / 液两相流动, 研究其流型的产生和转换, 最早的尝试是由 Lovell (1985)<sup>[6]</sup> 报道的. 实验中用水模拟气相, 用粘度较大的聚丙烯乙二醇 (PPG) 模拟液相, 实验段为内径 25.4 mm 的水平玻璃管, 长 6.3 m. 随后, 其它液体, 如煤油、重油、硅油和添加了表面活性剂的硅油也被用来模拟液相 (气相一般用水模拟), 得到了大量的实验数据 (Karri & Mathur (1987); Lovell (1988); Fujii et al. (1994))<sup>[7~9]</sup>.

Rezkallah (1990)<sup>[10]</sup> 曾将 Karri & Mathur 得到的模拟微重力条件下的气 / 液两相流流型图和 1987 年以前的几组微重力实验结果进行了比较, 发现其中泡状流 - 弹状流间的转换边界和微重力实验结果符合较好, 但弹状流 - 环状流间的转换边界却明显左移, 以致该流型图上对应环状流的区域包含了微重力实验得到的弹状流和弹 - 环状过渡流型数据, 甚至还有一些泡状流数据. 这说明等密度液 / 液系统中环状流要比真正的微重力条件下的气 / 液系统中出现得早 (即对相同的液相表观速度  $U_{SL}$ , 等密度液 / 液系统在较低的“气相”表观速度  $U_{SG}$  时就可能出现环状流动). 随后的微重力实验显示了同样的趋势. 由于中性悬浮实验所用液体间的表面张力与常见气 / 液两相系统相近, 上述差异主要应归于两相惯性力的不同. 最近, Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup> 发展了一个新的弹状流 - 环状流转换模型, 成功地解释了这一差异, 并将模拟实验结果与微重力实验结果统一了起来.

此外, 用 PPG 模拟液相时出现了一些异常流型, 如“逆环状流 (inverse annular flow)”, 即“气相”环绕管道周围而“液相”在管中央流动, 这引起了对该模拟方法有效性的怀疑 (Dukler et al. (1988); Rezkallah (1990); Reinarts et al. (1996))<sup>[12,10,4]</sup>. 事实上, 所谓的“异常流型”与管壁材料的润湿性 (wettability)、两相介质的粘度比及表观速度比等因素有关 (Joseph et al. (1997))<sup>[13]</sup>, 对其产生机理需要进行深入的研究.

## 2.2 毛细管实验

毛细管实验采用真正的气、液两相介质作为工作介质, 因此, 可以在正确模拟 Bond 数条件的同时, 较好地模拟两相惯性力之间的关系, 从而避免了中性悬浮实验中出现的一些问题; 另一方面, 地面重力水平稳定, 小尺度实验设备又可安全地使用种类繁多的液、气两相介质作为工作介质, 这些都是微重力实验所无法具备的. 此外, 毛细管实验设备造价和运行费用都十分低廉, 也是其优势之一.

Suo & Griffith (1964)<sup>[14]</sup> 最早对毛细管 (内径 1 mm 和 1.6 mm) 内气 / 液两相弹状流进行了实验研究, 认为表面张力的作用远大于重力. 如前所述, 这正是其模拟微重力条件下气 / 液两相流的基础.

Oya (1971)<sup>[15]</sup> 研究了进口段及液相物性对毛细管 (内径 2 mm, 3 mm 和 6 mm) 内水 / 气两相上升流流型的影响. Barnea et al. (1983)<sup>[16]</sup> 研究了内径 4 mm~12.3 mm 的水平和垂直管内的水 / 气两相流动. Graska (1986)<sup>[17]</sup> 研究了具有不同表面张力的液 / 气两相系统在内径小于 5 mm 的硼硅酸玻璃毛细管内的流动. Damianides & Westwater (1988)<sup>[18]</sup> 研究了内径 1 mm~5 mm 硼硅酸玻璃毛细管内水 / 气两相流动. Fukano & Kariyasaki (1993)<sup>[19]</sup> 研究了毛细管 (内径 1 mm, 2.4 mm 和 4.9 mm) 内水 / 气两相上升、下降与水平流动, 并与大直径管内的流动进行了对比. Mishima & Hibiki (1996)<sup>[20]</sup> 研究了内径 1 mm~4 mm 的玻璃及铝管内的水 /

气两相流动. 这些研究都表明, 表面张力是影响毛细管气 / 液两相流流型的重要因素.

Barajas & Panton (1993)<sup>[21]</sup> 研究了水 / 气两相流在具有不同壁面润湿性的水平毛细管 (内径 1.6 mm) 内的流动. 这里, 壁面润湿性的优劣用接触角  $\theta$  的大小来表示:  $\theta = 0^\circ$  表示完全润湿;  $\theta = 180^\circ$  表示完全不润湿;  $\theta$  由小变大, 相应的润湿性逐渐减弱. 实验结果表明 (图 2, 这里流型分类与前略有不同), 壁面润湿性对流型有着很大的影响, 尤其对液相流量较小而气相流量较大的情形, 当壁面润湿性较好 (如硼硅酸玻璃,  $\theta = 34^\circ$ ) 时存在波状 (分层) 流 (wavy flow); 而当壁面润湿性较差 (如聚乙烯树脂,  $\theta = 61^\circ$ ; 聚氨基甲酸酯树脂,  $\theta = 74^\circ$ ; FEP (一种含氟聚合物),  $\theta = 106^\circ$ ) 时, 波状 (分层) 流被溪状流和多溪状流 (rivulet flow 和 multiple rivulet flow, 即液相像小溪一样沿管壁曲折流动, 其位置可以在管道上部、中部和下部) 取代, 而且, 随着接触角增大, 多溪状流边界上移, 使原来的环状流区域大多为其占据. 由于流型观测往往由流道侧面进行, 溪状流和多溪状流中液相是否贴壁难以确定, 是否属于“逆环状流”还有待进一步研究.

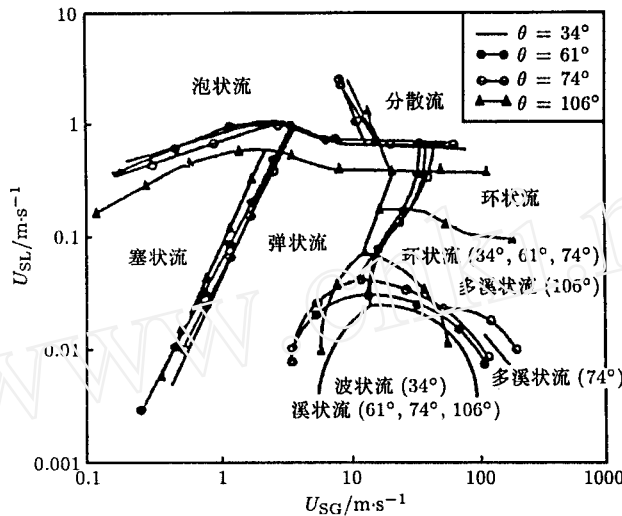


图 2 壁面润湿性对毛细管气 / 液两相流流型的影响 (Barajas & Panton, 1993)<sup>[21]</sup>

Galbiati & Andreini (1994)<sup>[22]</sup> 和 Downing (1994)<sup>[23]</sup> 对利用毛细管模拟微重力条件下气 / 液两相流动的可行性进行了实验研究, 认为毛细管实验可以很好地模拟微重力条件下的气 / 液两相流动. 不过, Reinarts et al. (1996)<sup>[4]</sup> 认为, 毛细管实验无法很好地模拟微重力条件下大管径气 / 液两相流动, 其原因在于毛细管实验无法满足 Reynolds 数  $Re = \rho U D / \mu$  (这里  $U$  和  $\mu$  分别表示速度和动力粘性系数) 相似的要求.

### 3 微重力实验

微重力实验是在真正的低重力或微重力环境中进行的气 / 液两相流动的实验研究. 目前常用的微重力实验设施有失重飞机和落塔等, 其中尤以失重飞机最为常用, 如美国 NASA 使用 KC-135, DC-9 和 Lear Jet; 法国在 1996 年以前使用“快帆” (Caravelle), 以后改用空中客车 A300; 俄罗斯使用 IL-76. 图 3 为 NASA/KC-135 失重飞机飞行过程中重力水平随时间变化的典型曲线. 由此可知, 失重飞机在沿抛物线轨迹飞行时所能达到的低重力水平约为  $10^{-2}g \sim 10^{-3}g$ , 残余重力较大; 低重力持续时间约 20s, 实验时间太短. 此外, 由于失重飞机在抛物线飞行前后处于超重状态, 抛物线飞行过程中残余重力有着剧烈的波动, 这些对流动特性及流动参数的准确测量都有较大影响. 落塔尽管可以产生高达  $10^{-5}g$  的微重力水平, 但微重力持续时间一般仅 5

秒左右。因此，目前急需进行长时间的、高微重力水平 ( $10^{-5}g$ ) 的气 / 液两相流实验。在其他更优良的载体 (如航天飞机和空间站) 上进行较长时间的气 / 液两相流实验研究，目前也已在计划或实施之中，所获得的实验结果有望对气 / 液两相流流型的产生和转换机理提供更深入的理解。

早期低重力条件下的两相流实验研究为数较少，且多集中于沸腾 (boiling) 传热等问题 (Siegel (1967))<sup>[24]</sup>。Evans (1963)<sup>[25]</sup> 最早对低重力条件下的两相流作了直接目测

观察。Koestel & Gutstein (1964)<sup>[26]</sup> 和 Albers & Macosko (1965)<sup>[27]</sup> 利用汞蒸气凝结产生的两相流研究了低重力条件下的流型及压力降等。Hepper et al. (1975)<sup>[28]</sup> 系统地研究了低重力条件下双组分气 / 液两相绝热流型，成为早期研究的突出代表。实验是在 NASA/KC-135 失重飞机上进行的，工作介质为水和空气，流型用高速摄影记录。实验段内径 25.4 mm，长径比约为 20。由于实验段较短，导致对流型是否充分发展存有疑虑；此外，该实验对本质相同的情形给出了明显不同的结果，因此，并未能得到任何确定性的结论。

80 年代以后的实验研究工作可以按工作介质的不同分为两类 (表 1)：双组分气 / 液两相绝热流动和单组分汽 / 液两相绝热流动，下面将分别予以简要介绍。

### 3.1 双组分气 / 液两相绝热流动

微重力条件下双组分气 / 液两相绝热流型的实验研究以 Dukler et al. (1988)<sup>[12]</sup> 为代表。实验是在 NASA Lewis 研究中心 30 m 落塔和 Lear Jet 上进行的，微重力持续时间分别为 2.2 s 和 12 s~22 s。实验段用透明有机玻璃制造，内径 9.5 mm (落塔) 和 12.7 mm (Lear Jet)，长度 0.457 m (落塔) 和 1.06 m (Lear Jet)，工作介质为水和空气，流型用高速摄影记录。这是首次成功而全面的实验研究，观察到了微重力条件下所有可能的流型，并收集了足够多的数据，给出了首张微重力条件下气 / 液两相流流型图 (图 4)，对以后的研究产生了极大的影响。事实上，目前微重力条件下气 / 液两相流流型的

分类方法一般都是沿用 Dukler et al. 的定义。此后的实验研究工作大大扩展了实验段几何参数、流体种类和两相速度等的范围，收集了大量的流型数据，为深入理解微重力条件下气 / 液两相流动机理，建立正确的流型产生和转换模型提供了一定的依据。

### 3.2 单组分汽 / 液两相绝热流动

在单组分汽 / 液两相绝热流型的实验研究中，一般是将接近饱和的液体泵入蒸发器，产生汽 / 液两相混合流动，在绝热实验段进行流型观测等研究。实验所用工作介质有 R114, R11

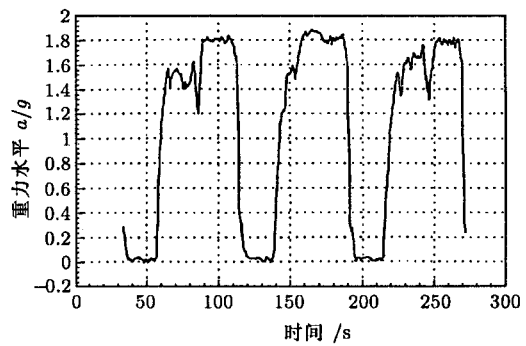


图 3 NASA/KC-135 失重飞机重力水平的变化 (Zhao & Rezakallah, 1993)<sup>[3]</sup>

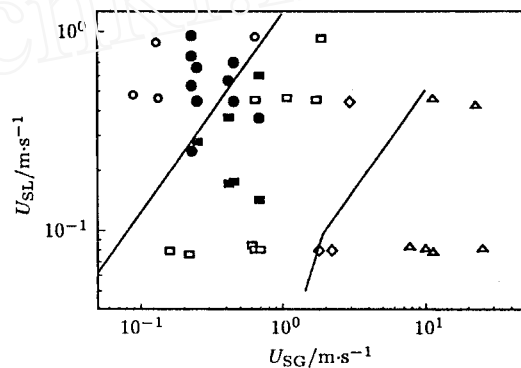


图 4 低重力条件下气 / 液两相流流型实验结果 (Dukler et al. 1988)<sup>[12]</sup>

落塔：● 泡状流，■ 弹状流。  
失重飞机：○ 泡状流，□ 弹状流，  
◇ 弹 - 环状过渡流型，△ 环状流。  
实线为空隙率模型预测结果

和 R12 等, 所观察到的流型和双组分气 / 液两相绝热流动中的一致. 其中, 最具代表性的是 Reinarts (1993)<sup>[43]</sup> 的实验, 它克服了以前同类实验中的一些缺陷, 并大大扩展了两相介质表观流速的范围. 实验段内径 4.7 mm 和 10.5 mm. 小管径情形仅有环状流数据, 对研究流型转换没有太大意义. 大管径情形包含了全部主要流型, 其中尤以弹状流和环状流数据最为丰富, 较准确地定义了弹状流与环状流之间的转换边界; 泡状流尽管只有一个数据点 (另有三个数据点为泡 - 弹状过渡流型), 但也给出了有关泡状流与弹状流之间转换的重要信息, 例如, 与水 / 气两相流不同, 泡状流仅出现在极低的气相表观速度 ( $U_{SG} < 0.05 \text{ m/s}$ ) 时, 说明流体物理性质对流型的产生和转换有着重要影响.

表 1 近期微重力条件下的气 / 液两相流实验简表

作者	工作介质	实验段直径 (mm)	长径比	观测流型	微重力设施	
Lee (1987) <sup>[29]</sup>	空气 / 氮气 - 水	6	250	B, S, A	失重飞机	
Dukler et al. (1988) <sup>[12]</sup>	空气 - 水	12.7	83	B, S, A	失重飞机	
		9.5	48	B, S	落塔	
Janicot (1988) <sup>[30]</sup>	空气 - 水	12.7	83	B, S, A	失重飞机	
Colin et al. (1991) <sup>[31]</sup>	空气 - 水	40	80	B, S	失重飞机	
Huckerby & Rezkallah (1992) <sup>[32]</sup>	空气 - 水	9.5	83	B, S	失重飞机	
Zhao & Rezkallah (1993) <sup>[3]</sup>	空气 - 水	9.5	87	B, S, A	失重飞机	
Bousman (1995) <sup>[33]</sup>	空气 - 水	12.7	83	B, S, A	失重飞机	
		25.4	63	B, S, A	失重飞机	
		12.7	83	B, S, A	失重飞机	
		25.4	63	B, S, A	失重飞机	
Fujii et al. (1995) <sup>[34]</sup>	氮气 - 水	10.5	48	B, S, A	失重飞机	
		6	80	B, S	失重飞机	
		10	80	B, S	失重飞机	
		19	80	B, S	失重飞机	
Colin & Fabre (1995) <sup>[35]</sup>	空气 - 水	6	80	B, S	失重飞机	
		10	80	B, S	失重飞机	
Zhao & Rezkallah (1995) <sup>[36]</sup>	空气 - 水	9.5	87	B, S, A	失重飞机	
Rite & Rezkallah (1997) <sup>[37]</sup>	空气 - 水	9.5	94	B, S, A	失重飞机	
Fujii et al. (1997) <sup>[38]</sup>	氮气 - 水	10.5	19	A	落塔	
Balakotaiah et al. (1998) <sup>[39]</sup>	空气 - 水	10.5	19	A	落塔	
		空气 - 水 / 甘油			B, S, A	失重飞机
		空气 - 水 / ZonylFSP			B, S, A	失重飞机
Hill et al. (1987) <sup>[40]</sup>	R114	15.8	116	S, A	失重飞机	
Crowley & Sam (1991) <sup>[41]</sup>	R11	6.34	158	S, A	失重飞机	
Hill & Best (1991) <sup>[42]</sup>	R12	8.8	138	S, A	失重飞机	
Reinarts (1993) <sup>[43]</sup>	R12	4.7	255	A	失重飞机	
		10.5	114	B, S, A	失重飞机	

表中“观测流型”栏中 B, S, A 分别代表泡状流, 弹状流, 环状流.

#### 4 微重力条件下气 / 液两相流流型转换模型

对微重力条件下气 / 液两相流流型转换模型的研究主要通过以下几种途径进行: 第一种方法是基于 1-g 模型的推广, 即将常重力条件下建立的、基于经验或半经验的流型转换判据, 直接或经过某种修正外推应用到微重力条件下的气 / 液两相流动 (Eastman et al. (1984); Karri & Mathur (1988); Crowley et al. (1992))<sup>[44~46]</sup>. 然而, 如前所述, 基于经验或半经验的流型转换判据对未经校验的情况往往并不成功; 在微重力条件下, 尽管它们都正确预言了三种主要流型, 但各流型的边界及其变化趋势差异极大 (Hewitt, 1996)<sup>[2]</sup>. 因此, 本文将不再对此做过多评论. 第二种方法称为空隙率模型. 这种方法基于对微重力条件下的气 / 液两相流流型图像信息的分析, 认为流型的转换主要源于气泡的合并. 该模型预测的流型转换条件往往对应于某个恒

定的空隙率 (Dukler et al. (1988); Colin et al. (1991, 1996); Bousman (1995))<sup>[12,31,47,33]</sup>. 第三种方法是作用力平衡分析, 即对两相流系统中各种作用力进行评估, 假设流型转换发生在作用力间的平衡遭到破坏时 (例如, Lee (1987)<sup>[29]</sup> 和 Reinarts (1995)<sup>[48]</sup> 假设当表面张力大于液相中的剪切应力时泡状流将转换为弹状流), 从而建立流型转换的判据. 采用这种方法的还有 Lee (1993)<sup>[49]</sup> 和 Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup>. Zhao & Rezkallah (1993)<sup>[3]</sup> 和 Rezkallah (1996)<sup>[50]</sup> 经验模型同样属于此类. 由于在所得流型转换判据中, Weber 数  $We = \rho U^2 D / \sigma$  有着很重要的作用, 因此又称为 Weber 数模型. Jayawardena et al. (1997)<sup>[51]</sup> 利用量纲分析方法并结合实验结果, 得出一个经验模型, 本质上可视为空隙率模型和 Weber 数模型的组合. 此外, Carron & Best (1994, 1996)<sup>[52,53]</sup> 利用对环状流的线性稳定性分析发现, 在微重力条件下中性波数能够有效地预测流型的转换, 不过, 这种方法很难得出用表观速度表示的流型图. 这里主要介绍空隙率模型和 Weber 数模型.

#### 4.1 空隙率模型

空隙率模型最初由 Dukler et al. (1988)<sup>[12]</sup> 提出, 是个半经验模型. 随后由 Colin et al. (1991, 1996)<sup>[31,47]</sup> 和 Bousman (1995)<sup>[33]</sup> 作了改进.

在微重力环境中, 由于浮力效应大大削弱甚至完全消失, 气、液两相间不再存在局部速度滑移现象 (Kamp et al. (1993))<sup>[54]</sup>. 但是, 气、液两相在管内沿径向分布的不均匀性, 使得截面平均的两相速度并不一致, 从而产生宏观的速度滑移现象. 利用 Zuber & Findlay (1965)<sup>[55]</sup> 滑移流模型 (drift-flux model) 并结合微重力条件下无局部速度滑移的特点, 可以将泡状流和弹状流中气液两相表观速度之间的关系表示为

$$\bar{U}_{SL} = U_{SG}(1 - \alpha C_0) / (\alpha C_0) \quad (1)$$

这里,  $\alpha$  为截面平均的空隙率,  $C_0$  为气相分布参数, 其数值约为 1.2, 需要由实验确定.

空隙率模型认为, 控制泡状流向弹状流转换的机理是气泡合并, 当分散的气泡合并长大, 形成尺寸超过管道内径的 Taylor 气泡, 流动即由泡状流转换为弹状流. 气泡的合并依赖于气泡的装填程度, 即空隙率的大小. 对单一尺寸的球形颗粒在最松散的规则装填方式 (立方体排列) 下最大空隙率为 0.52, 因此, 泡状流中气泡的空隙率将不会超过该值. 实验发现泡状流向弹状流的转换确实发生在某个临界空隙率  $\alpha_{c1}$  (称为第一临界空隙率) 处, 将该临界值代入方程 (1) 即得到泡状流向弹状流的转换条件. 不过, 不同的研究者对不同管径、流体粘性及表面张力等情形的研究发现,  $\alpha_{c1}$  有一个很大的取值范围 (0.18~0.45), 说明上述因素对其影响很大. Colin et al. (1996)<sup>[47]</sup> 建议用两个无量纲参数  $X_C = \alpha_{c1} C_0$  和  $N_D = \sigma D \rho_L / \mu_L^2$  来表示泡状流 - 弹状流间的转换条件: 当  $N_D < 1.5 \times 10^6$  时  $X_C = 0.54$ , 当  $N_D > 1.7 \times 10^6$  时  $X_C = 0.24$  (图 5).

Jayawardena et al. (1997)<sup>[51]</sup> 利用量纲分析并结合实验数据, 得出泡状流 - 弹状流间的转换条件为

$$Re_{SG} / Re_{SL} = K_1 Su^{-2/3} \quad (2)$$

其中,  $Re_{SG} = \rho_G U_{SG} D / \mu_G$ ,  $Re_{SL} = \rho_L U_{SL} D / \mu_L$ ,  $Su = Re_{SL}^2 / We_{SL} = N_D$ , 分别为气、液两相表观 Reynolds 数和液相 Suratman 数, 经验参数  $K_1 = 464.16$ . 利用滑移流模型 (式 (1)), 由上式可得

$$X_C = N_D^{2/3} / (K_1 \nu_G / \nu_L + N_D^{2/3}) \quad (3)$$

图 5 也给出了式 (3) 对水 / 气两相流的预测结果, 和 Colin et al. (1996)<sup>[47]</sup> 模型预测结果迥异. 这两个经验模型分别是由几乎完全相同的几组实验结果归纳出来的, 其差别说明相应研究还有待深入.

对于环状流动, 利用动量平衡可得

$$\alpha^{5/2}/(1-\alpha)^2 = (f_1/f_{WL})(\rho_G/\rho_L)(U_{SG}/U_{SL})^2 \quad (4)$$

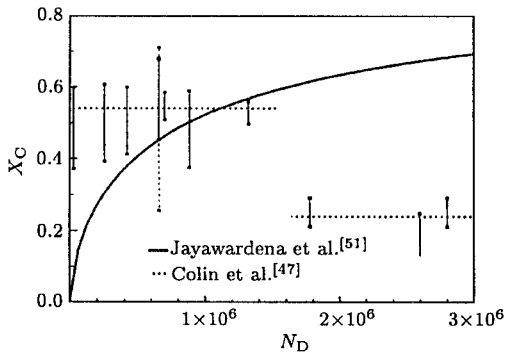


图5 微重力条件下泡状流 - 弹状流间的转换条件

这里  $f_1$  和  $f_{WL}$  分别表示相界面摩擦因子和液相壁面摩擦系数, 一般采用 Wallis (1972)<sup>[56]</sup> 模型或其修正形式以及 Blasius 摩擦关系式表示, 其数值依赖于气相和液相处于层流或湍流状态. 弹状流向环状流转换的条件由方程 (1) 和 (4) 确定. 若气、液两相都处于湍流状态, 可以得出其转换条件对应于另一临界空隙率  $\alpha_{c2}$  (称为第二临界空隙率), 其数值略小于  $1/C_0$ .

当  $Su < 10^6$  时, Jayawardena et al. (1997)<sup>[51]</sup> 经验模型预测弹状流 - 环状流间的转换条件为

$$Re_{SG}/Re_{SL} = K_2 Su^{-2/3} \quad (5)$$

其中, 经验参数  $K_2 = 4641.6$ . 此式可以改写为气、液两相表观速度比值的形式, 该比值依赖于具体的 Suratman 数, 本质上等价于空隙率模型.

需要说明的是, 在常重力气 / 液两相流流型转换模型中可以找到与上述空隙率模型相对应的流型转换准则. 例如: Taitel & Dukler (1976)<sup>[57]</sup> 模型中的临界空隙率准则除了多出一项表示非零的局部速度滑移项外, 与方程 (1) 完全相同, 其中  $C_0$  和  $\alpha_{c1}$  的取值也与这里相同; Barnea (1986)<sup>[58]</sup> 弹状流向环状流的转换准则中的临界液相体积分数 (其数值为 0.24, 相应的空隙率为 0.76) 概念, 也和这里第二临界空隙率在本质上是一致的. 事实上, Crowley et al. (1992)<sup>[46]</sup> 曾将上述常重力和微重力模型组合起来, 企图构造一套适用于各种重力水平的气 / 液两相流流型转换的统一模型.

#### 4.2 Weber 数模型

Lee (1987)<sup>[29]</sup> 基于作用力平衡分析提出了一个微重力条件下气 / 液两相流流型转换的理论模型. 作者分析了气 / 液两相流动中存在的四种基本流型 (弹状流、泡状流、环状流和分层流) 的特征和表面张力、湍流脉动应力、惯性力及体积力 (残余重力或浮力) 的作用, 针对微重力环境中两相流动的特点, 假设当表面张力居主导地位时流动为弹状流, 这是因为气相粘度一般小于液相, 在流动中往往为分散相, 表面张力的作用总是力图保持相同体积的分散相微团与外界流体间的相界面面积最小, 这就要求气相尽可能集中形成大气泡. 一旦其他作用力超过表面张力的作用, 即产生新的流型, 例如: 当湍流脉动应力大于表面张力时, 大气泡破碎成众多的小气泡, 流动即转换为泡状流; 当气相惯性力大于表面张力时, 相邻大气泡间的液膜被冲破, 流动中央形成连贯的气核, 流动即转换为环状流; 而当体积力大于表面张力时, 流动为分层流. 具体而言, 对于弹状流 - 环状流转换, 其条件可由下式确定

$$\rho_G U_G^2 / 2 = 2\sigma / R \quad (6)$$

这里,  $U_G$  和  $R$  分别表示气相的截面平均速度和管道内半径, 气相惯性力项中的因子 (1/2) 据 Reinarts (1995)<sup>[48]</sup> 添加. 重新整理可得用 Weber 数表示的转换条件

$$We_G = \rho_G U_G^2 D / \sigma = 8 \quad (7)$$



Reinarts (1995)<sup>[48]</sup> 利用和 Lee (1987)<sup>[29]</sup> 相同的思想, 提出了一个微重力条件下气 / 液两相流型转换模型, 其主要变化是将表面张力项中的管道内半径  $R$  改为气泡前端的特征半径  $R_B$ , 即

$$\rho_G U_G^2 / 2 = 2\sigma / R_B \quad (8)$$

由此可得

$$U_G = [4\sigma / (R_B \rho_G)]^{1/2} \quad (9)$$

为了确定  $R_B$ , 假设: (1) 弹状流中长条状气泡 (elongated bubble) 前端为经典 Taylor 气泡的球壳状; (2) 球壳半径近似等于管道内半径减去流动为环状时液膜的厚度; (3) 环状流在转换边界附近气核区无夹液. 利用动量平衡可以得到与方程 (4) 类似的关系, 相界面摩擦因子采用 Wheeler (1992)<sup>[59]</sup> 通过微重力实验所得的经验关系式 (本质上仍属于 Wallis 模型的修正形式). 将所得动量平衡关系与方程 (9) 联立即可求得以气、液两相截面平均速度表示的转换条件及液膜厚度 (对应于空隙率), 并可以方便地用表观速度表示.

最近, Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup> 认为气相惯性力是作用在横过管道中央并随液相运动的液膜上, 其特征值应该表示为  $\rho_G U_G (U_{SG} - U_{SL})$ . 假设弹状流 - 环状流转换边界附近气相惯性力和表面张力的比值为  $\kappa$  (其数值由经验确定), 结合式 (1) 可得如下无量纲形式的弹状流 - 环状流转换模型

$$W_G = We_{SG}^{1/2} = [4\kappa C_0 \alpha (1 - \alpha) / (C_0 - 1)]^{1/2} \quad (10)$$

$$W_L = (\rho_G / \rho_L)^{1/2} We_{SL}^{1/2} = W_G (1 - C_0 \alpha) / (C_0 \alpha) \quad (11)$$

其中, 经验参数  $C_0 = 1.16$ ,  $\kappa = 0.8$ .

此外, Lee (1993)<sup>[49]</sup> 假设气相通过毛细管引入液相中, 将气泡在毛细管出口处所受作用力 (表面张力、气相惯性力、体积力、粘性阻力、附加质量力等) 化分为使气泡附着或脱离管口两类, 通过两个主要作用力的平衡关系确定气泡尺寸并与管道直径相比较, 同时, 考虑了管道内的湍流脉动作用和气泡合并现象, 得到一套关于微重力条件下气 / 液两相流型转换的理论判据. 这一模型可以计及进口效应. 但是, 由于许多情形中气相的引入无法归于上述假设, 这同时也局限了它的应用范围.

Zhao & Rezkallah (1993)<sup>[3]</sup> 根据微重力飞行实验数据提出了一个纯经验模型. 如前所述, 作者在泡状流、弹状流和环状流三种主要流型之外又定义一种新的流型: 泡沫状弹 - 环状流. 以气液两相表观 Weber 数  $We_{SG} = \rho_G U_{SG}^2 D / \sigma$  和  $We_{SL} = \rho_L U_{SL}^2 D / \sigma$  为坐标绘制低重力两相流型图, 发现流型间的转换近似发生在气相表观 Weber 数为常数的地方, 例如, 泡状流或弹状流向泡沫状弹 - 环状流的转换以及泡沫状弹 - 环状流向环状流的转换分别对应于  $We_{SG} = 1$  和  $We_{SG} = 20$ . 由于其他研究者往往把泡沫状弹 - 环状流视为弹 - 环状过渡流型, 因此, 可以将气相表观 Weber 数等于 1 和  $We_{SG} = 20$  所定义的区域作为弹状流或泡状流与环状流间的转换边界.

当  $Su > 10^6$  时, Jayawardena et al. (1997)<sup>[50]</sup> 经验模型预测弹状流 - 环状流间的转换条件为

$$Re_{SG} = K_3 Su^2 \quad (12)$$

其中, 经验参数  $K_3 = 2 \times 10^{-9}$ . 对具体的实验管道及工作介质 (即确定的 Suratman 数), 上式预测弹状流 - 环状流转换边界上液相表观速度为常值, 类似于 Zhao & Rezkallah (1993)<sup>[3]</sup> 的模型.

## 5 比较和讨论

本节将简要介绍微重力条件下气 / 液两相流流型转换模型的预测结果和实验数据的比较, 着重对一些相关问题予以探讨, 指出今后研究中应注意的几个方向。

### 5.1 泡状流 - 弹状流间的转换

在前述微重力气 / 液两相流流型转换模型中, 涉及泡状流 - 弹状流转换的主要是空隙率模型。至于 Lee (1987)<sup>[29]</sup> 模型对此转换的预测, Rezkallah (1990)<sup>[10]</sup> 曾和当时的一些低重力实验数据作过比较, 发现二者吻合很差。在空隙率模型中, 适当调整  $C_0$  和  $\alpha_{c1}$  的大小, 可使该模型很好地将实验数据中的泡状流与弹状流分开。然而, 要使该模型对其他流动情形也有很好的预测能力, 必须给出确定这两个经验参数的理论的或经验的关系。为此, 对经验参数  $C_0$  和  $\alpha_{c1}$  分别进行探讨是有益的。

等直径球的规则排列表明存在泡状流的临界空隙率上界约为 0.52 (立方体排列), 这对应于从等直径球得到的“最松的”排列 (“最紧的”排列为菱面体排列, 相应的空隙率为 0.74, 这对应于弹状流 - 环状流转换的第二临界空隙率相近)。实际流动中气泡尺寸并不均匀, 有一个谱分布, 较小气泡有可能充填在较大气泡形成的间隙中而不会相互接触, 从而使  $\alpha_{c1}$  的数值增大。另一方面, 规则排列在现实中往往是不可能的, 液相“桥拱”现象的客观存在使得在较小的空隙率时就有大量的气泡相互接触、合并, 从而使  $\alpha_{c1}$  的数值减小。这两种趋势显然和管径、流体粘性、表面张力等等因素有着很大的关系, 但如何准确预测上述过程, 给出不同情形中  $\alpha_{c1}$  的准确数值, 目前仍没有解决。这将是空隙率模型普适化的一个大难题。

Colin et al. (1991)<sup>[31]</sup> 测量了常重力和低重力条件下实验段进口和出口处气泡尺寸的分布, 发现在常重力条件下二者差别很小, 而在微重力条件下出口处气泡尺寸扩展很大, 说明微重力条件下气泡间有强烈的合并现象发生。Kirkpatrick & Lockett (1974)<sup>[60]</sup> 曾研究了常重力条件下单个气泡和平直自由表面 (相当于一个直径无限大的气泡) 的合并现象。气泡是在自由表面下某处释放, 在浮力作用下加速上升, 因此释放点距自由表面的距离对应于二者间的相对速度。实验发现, 该距离很小时, 气泡与自由表面合并所需时间很短; 当该距离超过某一数值, 合并所需时间急剧增大, 随后合并所需时间的增加则很缓慢。这表明气泡合并所需时间强烈依赖于其相互接近的速度, 相对速度越大, 合并越困难。常重力条件下, 局部速度滑移引起气泡后面的尾流, 尾流对进入该区域的其他气泡的抽吸增大了二者相互接近的速度, 使得合并难以成功。此外, 湍流脉动作用也有可能使气泡在合并前就分开了。进一步的研究证实了这一观点 (Lockett & Kirkpatrick (1975))<sup>[61]</sup>。这方面研究的最新进展可以参阅 Prince & Blanch (1990)<sup>[62]</sup> 和 Millies et al. (1996)<sup>[63]</sup> 的文献。利用上述研究结果, 可以推断, 在微重力条件下, 局部速度滑移大大减弱甚至完全消失, 尾流现象不明显, 气泡间相对速度很小, 因此气泡合并的成功率就大大增加。为了准确预测不同情形中的  $\alpha_{c1}$ , 需要进一步加强气泡合并机理与预测模型的研究。

至于气相分布参数  $C_0$ , 由局部空隙率  $\epsilon$  和局部速度  $u$  可得

$$C_0 = \langle \epsilon u \rangle / (\alpha U_M) \quad (13)$$

这里,  $\langle \cdot \rangle$  表示截面平均,  $U_M = U_{SL} + U_{SG}$ 。这样,  $C_0$  的数值反映了气相空隙率分布的某些信息: 若  $C_0 > 1$ , 可以推断气相将相对集中于流速较高的管道中央。Kamp et al. (1993)<sup>[54]</sup> 曾尝试对微重力条件下局部空隙率和速度进行了实验测量, 利用上式可计算出  $C_0 = 1.15$ 。这和微重力条件下实验数据的拟合结果相近。

Colin et al. (1991)<sup>[31]</sup> 和 Bousman (1995)<sup>[33]</sup> 的研究表明,  $C_0$  在弹状流和泡状流中具有类似的特征。Fabre & Line (1992)<sup>[64]</sup> 总结了弹状流中气泡运动的实验和理论研究结果, 发现流动

为湍流时, 不论重力水平如何,  $C_0$  取值都与 1.2 十分接近. Hewitt (1996)<sup>[2]</sup> 评述了近期一些常重力条件下的实验研究和不同重力条件下的数值模拟. 在常重力条件下, 实验研究和数值模拟所得结果都和前人研究结果符合很好, 在微重力条件下  $C_0$  与流道安装方位无关, 其数值约为 1.16.

由于气相分布对  $C_0$  有很大的影响, 对微重力情形中气泡横向迁移的机理进行深入研究是十分必要的. 但是, 有关气泡横向作用力平衡的具体机制目前还很不清楚, 基于双流体连续介质模型的数值计算模式还不能正确模拟空隙率的变化趋势, 因此, 在改进现有数值计算模式的同时, 实验测量就显得更为重要. 不过, Kamp et al. (1993)<sup>[54]</sup> 发现在作抛物线飞行的失重飞机上做这类实验是很困难的 (微重力持续时间短, 残余重力波动剧烈, 这些都会对测量精度产生极大影响). 除了在诸如航天飞机与空间站等更优良的微重力设施上进行这类实验外, 由于中性悬浮实验对泡状流 - 弹状流转换可以得到和飞行实验相同的结果, 采用中性悬浮实验也许是一个方便又廉价的替代方法.

## 5.2 弹状流 - 环状流间的转换

Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup> 详细比较了前述各个模型 (图 6(a), (b) 分别表示双组分气 / 液两相流和单组分汽 / 液两相流的情形). 由于实验所得弹状流 - 环状流转换边界是一个较宽的条带区域, 各种模型预测的边界线尽管相差很大, 但在流型图的某些范围内, 相对于这一转换条带, 可以认为其预测是相同的, 但超出这一范围相互间的差异就变得十分明显. 比较发现: Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup> 理论模型 (式 (10) 和 (11)) 与实验结果符合最好, 而且, 还较好的预测了地面模拟实验 (中性悬浮实验和毛细管实验) 的结果. 空隙率模型对水 / 气两相流流型的预测尚可, 但与汽 / 液两相流流型实验结果则差别极大. Lee (1987)<sup>[29]</sup> 模型和 Reinarts (1995)<sup>[48]</sup> 模型对小液相流量情形预测较好, 但对大液相流量情形预测都较差, 尽管 Reinarts 模型的预测精度有所提高. Zhao & Rezkallah (1993)<sup>[3]</sup> 经验模型预测了一个较宽的条带型转换区域, 尽管与实验结果相符, 但不够精确, 以致该区域包含了为数颇多的弹状流和环状流的实验数据. Jayawardena et al. (1997)<sup>[51]</sup> 经验模型在  $Su > 10^6$  时很好地预测了弹状流和环状流间的转换边界, 其结果和 Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup> 理论模型难分高低; 在  $Su < 10^6$  时该模型与空隙率模型类似, 但预测结果较差.

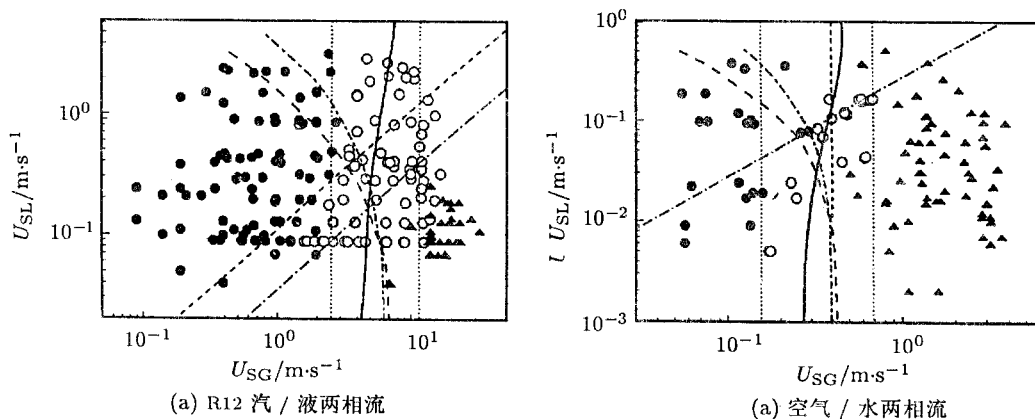


图 6 微重力条件下气 / 液两相流流型转换模型与实验结果的比较 (Zhao & Hu, 1999)<sup>[11]</sup>

实验数据: ● 弹状流, ○ 弹 - 环状过渡流型, ▲ 环状流.

理论模型: —— Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup>, --- Lee (1987)<sup>[29]</sup>, ..... Zhao & Rezkallah (1993)<sup>[3]</sup>,  
- - - - Bousman (1995)<sup>[33]</sup>, --- Reinarts (1995)<sup>[48]</sup>, - - - - Jayawardena et al. (1997)<sup>[51]</sup>.

由于 Zhao & Hu (1999)<sup>[11]</sup> 理论模型中含有两个经验参数  $C_0$  和  $\kappa$ , 还不能称为是真正的物理模型, 因此, 对弹状流和环状流间的转换仍需进行深入的研究.

## 6 结束语

气 / 液两相流动是一类具有重要学术意义和重大应用价值的流动现象, 流型研究是其中最基本的课题之一, 已经有数十年的研究历史. 但是, 由于这一现象的极端复杂性, 有关知识目前仍然很有限. 微重力环境中重力影响的减弱或消失, 大大简化了流动中各种不同因素间的相互作用, 可以很好地研究其流动特征及流型产生和转换机理, 从而建立正确的流型转换模型, 准确预测流型的产生与转换. 同时, 在应用方面, 该课题既是人类开发和利用空间所必须解决的关键技术问题之一, 又可利用其所得到的规律性知识来改进地面常重力环境中的两相流动系统, 因此具有十分重要的意义.

本文简要介绍了微重力条件下气 / 液两相流流型研究的基本方法以及实验和理论研究方面的主要进展等, 目的在于增进认识, 促进该课题研究的深入开展. 同时, 分析了目前研究中存在的不足, 指出了今后应该注意的一些研究方向.

**致谢** 本文是在合作导师胡文瑞院士指导下完成的, 胡先生认真审阅了初稿, 并提出了详细的修改意见. 此外, 刘大有教授对初稿提出了许多建设性意见. 在此, 谨对他们的热情帮助和支持表示衷心感谢!

## 参 考 文 献

- 1 Spedding P L, Spence D R. Flow regimes in two-phase gas-liquid flow. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19(2): 245~280
- 2 Hewitt G F. Multiphase flow: the gravity of the situation. In: 3rd Microgravity Fluid Physics Conf, Jul 13~15, 1996, Cleveland, Ohio
- 3 Zhao L, Rezkallah K S. Gas-liquid flow patterns at microgravity conditions. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19(5): 751~763
- 4 Reinarts T R, Ochterbeck J, Lebaigue O, Yan Y. A review of flow regimes, pressure drops, convective boiling, and condensation in microgravity environments. In: 31st AIAA Thermophysics Conf, Jun 17~20, 1996, New Orleans, LA: AIAA paper 96-1828, 1996
- 5 Antar B N. Gas-liquid two-phase flow dynamics in low gravity. In: 27th AIAA Fluid Dynamics Conf, Jun 17~20, 1996, New Orleans, LA: AIAA paper 96-2049, 1996
- 6 Lovell T W. Liquid-vapor flow regime transitions for use in design of heat transfer loops in spacecraft. AFWAL-TR-85-3021, 1985
- 7 Karri S B R, Mathur V K. Study of simulated microgravity vapor-liquid flow patterns. In: AIChE Annual Meeting, 1987, New York, NY
- 8 Lovell T W. Liquid-vapor flow regime transitions for spacecraft heat transfer loops. AFWAL-TR-88-3084, 1988
- 9 Fujii T, Ohta J, Nakazawa T, Morimoto O. The behavior of an immiscible equal-density liquid-liquid two-phase flow in a horizontal tube. *JSME Int J*, 1994, 37B(1): 22~29
- 10 Rezkallah K S. A comparison of existence flow-pattern predictions during forced-convective two-phase flow under microgravity conditions. *Int J Multiphase Flow*, 1990, 16(2): 243~259
- 11 Zhao J F, Hu W R. Slug to annular flow transition of microgravity two-phase flow. *Int J Multiphase Flow*, 1999 (submitted)
- 12 Dukler A E, Fabre J A, McQuillen J B, Vernon R. Gas-liquid flow at microgravity conditions: flow patterns and their transitions. *Int J Multiphase Flow*, 1988, 14(4): 389~400
- 13 Joseph D D, Bai R, Chen K P, Renardy Y Y. Core-annular flows. *Ann Rev Fluids Mech*, 1997, 29: 65~90
- 14 Suo M, Griffith P. Two-phase flow in capillary tubes. *Trans ASME J Basic Eng*, 1964, 86: 576~582
- 15 Oya T. Upward liquid flow in small tube into which air streams. *Bulletin of JSME*, 1971, 14(78): 1320~1329, 1330~1339
- 16 Barnea D, Luninski Y, Taitel Y. Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes. *Can J Chem Eng*, 1983, 61: 617~620
- 17 Graska M L. Effects of fluid surface tension and tube diameter on horizontal two-phase flow in small diameter tubes. [MS thesis]. Univ of Illinois, Urbana-Champaign, 1986

- 18 Damianides C A, Westwater J W. Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes. In: 2nd UK Nat Conf on Heat Transfer, 1988
- 19 Fukano T, Kariyasaki A. Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary tube. *Nucl Eng & Des*, 1993, 141: 59~68
- 20 Mishima K, Hibiki T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. *Int J Multiphase Flow*, 1996, 22(4): 703~712
- 21 Barajas A M, Panton R L. The effects of contact angle on two-phase flow in capillary tubes. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19(2): 337~346
- 22 Galbiati L, Andreini P. Flow pattern transition for horizontal air-water flow in capillary tubes: a microgravity "equivalent system" simulation. *Int Comm Heat & Mass Transfer*, 1994, 21(4): 461~468
- 23 Downing J P. Microscale modeling of microgravity multiphase flow. [MS thesis]. Dartmouth College, 1994
- 24 Siegel R. Effects of reduced gravity on heat transfer. *Adv Heat Transfer*, 1967, 4: 143~228
- 25 Evans D G. Visual study of swirling and nonswirling two-phase two component flow at 1 and 0 gravity. NASA-TM-X-725, 1963
- 26 Koestal A, Gutstein M U. Study of wetting and nonwetting mercury condensing pressure drops. NASA-TN-D-2514, 1964
- 27 Albers J A, Macosko R P. Experimental pressure drop investigation of nonwetting, condensing flow of mercury vapor in a constant diameter tube in 1-g and zero gravity environments. NASA-TN-D-2838, 1965
- 28 Hepper D B, King C D, Littles J W. Zero-g experiments in two-phase fluid flow regimes. ASME paper A75-40880, 1975
- 29 Lee D. Thermohydraulic and flow regime analysis for condensing two-phase flow in a microgravity environment. [Ph D Thesis]. Texas A & M Univ, 1987
- 30 Janicot A. Studies of gas-liquid flow under reduced gravity conditions. [MS thesis]. Univ of Houston, 1988
- 31 Colin C, Fabre J, Dukler A E. Gas-liquid flow at microgravity conditions—I. Dispersed bubble and slug flow. *Int J Multiphase Flow*, 1991, 17(4): 533~544
- 32 Huckerby C S, Rezkallah K S. Flow-pattern observations in two-phase gas-liquid flow in a straight tube under normal and microgravity conditions. *AIChE Proc*, 1992, 88: 139~147
- 33 Bousman W S. Studies of two-phase gas-liquid flow in microgravity. [Ph D thesis]. Univ of Houston, 1995
- 34 Fujii T, Nakazawa T, Asano H, Yamada H. Flow characteristics of gas-liquid two-phase annular flow under microgravity (experimental results utilizing parabolic trajectory flights). *Trans JSME*, 1995, 61B(585): 1640~1645
- 35 Colin C, Fabre J. Gas-liquid pipe flow under microgravity conditions: influence of tube diameter on flow patterns and pressure drops. *Adv Space Res*, 1995, 16(5): 137~142
- 36 Zhao L, Rezkallah K S. Pressure drop in gas-liquid flow at microgravity conditions. *Int J Multiphase Flow*, 1995, 21(5): 837~849
- 37 Rite R W, Rezkallah K S. Local and mean heat transfer coefficients in bubbly and slug flows under microgravity conditions. *Int J Multiphase Flow*, 1997, 23(1): 37~54
- 38 Fujii T, Nakazawa T, Asano H, Yamada H, Yoshiyama T. Flow characteristics of gas-liquid two-phase annular flow under microgravity (experimental results utilizing a drop tower). *Trans JSME*, 1997, 63B(606): 631~636
- 39 Balakotaiah V, Jayawardena S S, Nguyen L T. Studies on normal and microgravity annular two phase flows. In: Proc 4th Microgravity Fluid Physics & Transport Phenomena Conf, Aug 12~14, 1998, Cleveland, Ohio
- 40 Hill D, Downing R S, Rogers D, Teske D, Niggerman R. A study of two-phase flow in a reduced gravity environment. Final Report under Contract No. NAS9-17195, 1987
- 41 Crowley CJ, Sam RG. Microgravity experiments with a simple two-phase thermal system. PL-TR-91-1059, 1991
- 42 Hill W S, Best F R. Definition of two phase flow behaviors for spacecraft design. AFK-0062-FM-8933-418, 1991
- 43 Reinarts T R. Adiabatic two phase flow regime data and modeling for zero and reduced (horizontal flow) acceleration fields. [Ph D Thesis]. Texas A & M Univ, 1993
- 44 Eastman R E, Feldmanis C J, Haskin W L, Weaver K L. Two-phase fluid thermal transport for spacecraft. AFWAL-TR-84-3028, 1984
- 45 Karri S B R, Mathur V K. Two-phase flow pattern map predictions under microgravity. *AIChE J*, 1988, 34: 130~137
- 46 Crowley C J, Izenson M G, Barry J, Martin J L, Ent R S, Valenzuela J A. Design manual for two-phase components of spacecraft thermal management systems. PL-TR-92-3002, 1992
- 47 Colin C, Fabre J, McQuillen J. Bubble and slug flow at microgravity conditions: state of knowledge and open questions. *Chem Eng Comm*, 1996, 141/142: 155~173
- 48 Reinarts T R. Slug to annular flow regime transition modeling for two-phase flow in a zero gravity environment. In: Proc 30th Int Energy Conversion Eng Conf, Jul 30~Aug 4, 1995, Orlando, FL
- 49 Lee J. Scaling analysis of gas-liquid two-phase flow pattern in microgravity. In: 31st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Jan 11~14, 1993, Reno, NV
- 50 Rezkallah K S. Weber number based flow-pattern maps for liquid-gas flows at microgravity. *Int J Multiphase Flow*, 1996, 22(6): 1265~1270

- 51 Jayawardena S S, Balakotaiah V, Witte L C. Flow pattern transition maps for microgravity two-phase flows. *AIChE J*, 1997, 43(6): 1637~1640
- 52 Carron I, Best F. Gas-liquid annular flow under microgravity conditions: a temporal linear stability study. *Int J Multiphase Flow*, 1994, 20(6): 1085~1093
- 53 Carron I, Best F. Microgravity gas/liquid flow regime maps: can we compute them from first principles? In: *AIChE Heat Transfer Symp, Nat Heat Transfer Conf*, Aug, 1996, Houston, TX
- 54 Kamp A, Colin C, Fabre J. Bubbly flow in a pipe: influence of gravity upon void and velocity distributions. In: *Proc 3rd World Conf on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics & Thermodynamics*, Oct, 1993, Honolulu, USA
- 55 Zuber N, Findlay J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. *J Heat Transfer*, 1965, 87: 453~468
- 56 Wallis GB. *One-dimensional Two-phase Flow*. New York: McGraw-Hill, 1972
- 57 Taitel Y, Dukler A E. A model for prediction flow regime transition in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE J*, 1976, 22: 47~55
- 58 Barnea D. Transition from annular and from dispersed bubble flow-unified models for whole range of pipe inclinations. *Int J Multiphase Flow*, 1986, 12: 733~744
- 59 Wheeler MW. An experimental and analytical study of annular two phase pressure drop in a reduced acceleration field. [MS thesis]. Texas A & M Univ, 1992
- 60 Kirkpatrick RD, Lockett MJ. The influence of approach velocity on bubble coalescence. *Chem Eng Sci*, 1974, 29: 2363~2373
- 61 Lockett M J, Kirkpatrick R D. Ideal bubbly flow and actual flow in bubble columns. *Trans Inst Chem Eng*, 1975, 53: 267~273
- 62 Prince M J, Blanch H W. Bubble coalescence and break-up in air-sparged bubble columns. *AIChE J*, 1990, 36(10): 1485~1499
- 63 Millies M, Drew D A, Lahey R T Jr. A first order relaxation model for the prediction of local interfacial area density in two-phase flows. *Int J Multiphase Flow*, 1996, 22(6): 1073~1104
- 64 Fabre J, Line A. Modeling of two-phase slug flow. *Ann Rev Fluid Mech*, 1992, 24: 21~46

## A REVIEW OF TWO-PHASE GAS-LIQUID FLOW PATTERNS UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

Zhao Jianfu

National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100080, China

**Abstract** Two-phase gas-liquid flow is important for both scientific research and engineering application. The study of flow pattern is one of the most basic topics in this area. It is, however, an unfortunate fact that there isn't a generally recognized theory for flow pattern transition prediction because of its complexity at normal gravity. In microgravity environment due to the absence of gravity the dynamical interaction between different factors in the flow will be simplified and then flow patterns will become much simpler than those in normal gravity. It is thus very beneficial to study the mechanism of flow pattern transitions. A review of available literature pertaining to gas/vapor-liquid two-phase flow under microgravity conditions is presented, including the basic approaches and the results of testing and modeling. Some trends for future research in microgravity are also pointed out.

**Keywords** microgravity, gas-liquid two-phase flow, flow pattern, review